饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐生长性能、营养物质消化率、血清生化指标及毛皮品质的影响

刘　志[1,2]　吴学壮[1]　郭　强[3]　张铁涛[3]　郭俊刚[1]　高秀华[1*]　杨福合[3]　邢秀梅[3]

(1.中国农业科学院饲料研究所，北京 100081；2.吉林省特种经济动物分子生物学省部共建实验室，长春 130112；3.中国农业科学院特产研究所，长春 130112)

摘　要：本试验旨在研究饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐生长性能、营养物质消化率、血清生化指标及毛皮品质的影响。试验选取 115 日龄左右的健康雌性蓝狐 50 只，随机分成 5 组，每组 10 个重复，每个重复 1 只。以五水硫酸铜（$CuSO_4 \cdot 5H_2O$）为铜源，在基础饲粮中分别添加 0、12.22、32.22、72.22、152.22 mg/kg 的铜配成 5 种试验饲粮，5 种试验饲粮铜水平分别为 7.78（Ⅰ组，作为对照组）、20（Ⅱ组）、40（Ⅲ组）、80（Ⅳ组）、160 mg/kg（Ⅴ组）。预试期为 7 d，正试期为 60 d。结果表明：1)Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ组蓝狐的平均日增重显著高于对照组（P<0.05），料重比显著低于对照组（P<0.05）；各组蓝狐的终末体重及平均日采食量差异不显著（P>0.05）。2)各组蓝狐的干物质消化率、蛋白质消化率及氮沉积差异不显著（P>0.05）；Ⅲ、Ⅳ组蓝狐的脂肪消化率显著高于对照组（P<0.05），其他各组间差异不显著（P>0.05）；铜排出量随着饲粮铜水平的升高极显著的增加（P<0.01）。3)Ⅴ组蓝狐血清总蛋白和白蛋白含量显著高于对照组和Ⅱ组（P<0.05）；Ⅴ组蓝狐血清尿素氮含量显著高于Ⅱ组（P<0.05）；各组蓝狐血清铜蓝蛋白活性差异不显著（P>0.05），Ⅳ组蓝狐血清铜锌超氧化物歧化酶活性显著高于对照组及Ⅱ和Ⅲ组(P<0.05)。4)Ⅴ组蓝狐肝脏铜含量显著高于对照组（P<0.05），血清铜、锌、铁含量各组间差异不显著（P>0.05）。5)饲粮铜水平并未显著影响蓝狐的体长和干皮长（P>0.05）；Ⅲ和Ⅴ组蓝狐针毛长和绒毛长显著大于Ⅱ和Ⅳ组（P<0.05）；Ⅴ组蓝狐皮张颜色显著深于对照组（P<0.05）。由此可见，在饲粮中添加 32.22

收稿日期：
基金项目：国家自然资源平台专项“特种经济动物种质资源共享平台”(2005DKA21102)
作者简介：刘　志（1988—），男，山东青岛人，博士研究生，从事特种经济动物营养研究。E-mail： liuzhicaas@126.com
*通信作者：高秀华，研究员，博士生导师，E-mail：xiuhuagao@126.com

mg/kg 铜即铜水平为 40.00 mg/kg 时，冬毛期雌性蓝狐可获得较好的生长性能、营养物质消化率及毛皮品质，同时铜的排放量较低。

关键词：铜；生长性能；营养物质消化率；毛皮品质；冬毛期；蓝狐

中图分类号：S816　　　　文献标识码：A　　　　文章编号：

铜是毛皮动物必需的微量元素，在机体能量代谢、造血和被毛着色等生理过程中发挥重要作用[1]。铜缺乏会导致动物贫血、生长迟滞、骨骼异常以及被毛脱色等症状，而适宜铜水平则能够促进动物生长，提高饲粮的利用率[2]。冬毛期是蓝狐夏毛换冬毛、脂肪囤积及皮张成熟的关键时期[3]，微量元素铜在此时期发挥着重要作用。Aulerich 等[4-5]对冬毛期水貂的研究发现，饲粮中添加铜（100 或 200 mg/kg 硫酸铜）能够促进水貂生长并使毛色加深。Wu 等[6]研究表明，饲粮中添加铜能够提高冬毛期母貂采食量及脂肪的消化率，降低料重比。Zhong 等[7]研究表明，饲粮中添加 30 mg/kg 铜（铜源为柠檬酸铜）能够提高冬毛期银狐的毛皮品质。白玉妍等[8]研究表明，在乌苏里貉饲粮中添加蛋氨酸铜能提高毛皮的质量。此外，本课题组前期研究表明，饲粮铜水平为 40 mg/kg 时能促进育成期蓝狐的生长，提高饲粮蛋白质及脂肪的消化率[9]。目前，有关蓝狐冬毛期饲粮铜的适宜水平的研究尚未见报道，铜对冬毛期蓝狐生长及毛皮品质的影响还不可知。本试验以此为切入点，研究饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐生长性能、营养物质消化率、血清生化指标及毛皮品质的影响，为生产实践中合理配制蓝狐饲粮提供理论指导。

1　材料与方法

1.1　试验饲粮

鉴于国内还没有统一的蓝狐饲养标准，本试验参照美国 NRC（1982）[10]蓝狐营养需要量及国内外近年来的文献报道[11-13]，设计出蓝狐冬毛期的基础饲粮，其组成及营养水平见表 1。经测定，基础饲粮中铜水平为 7.78 mg/kg。以五水硫酸铜（$CuSO_4 \cdot 5H_2O$）为铜源，分别在基础饲粮中添加 0、12.22、32.22、72.22、152.22 mg/kg 铜，配制成 5 种试验饲料，试

验饲料中铜水平分别为 7.78（Ⅰ组，作为对照组）、20.00（Ⅱ组）、40.00（III组）、80.00（Ⅳ组）、160.00 mg/kg（Ⅴ组）。

表 1 基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 2 Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis) %

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
膨化玉米 Extruded corm	42.2
肉骨粉 Meat and bone meal	15.0
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	5.0
豆粕 Soybean meal	13.0
鱼粉 Fish meal	15.0
赖氨酸 Lys	0.3
蛋氨酸 Met	0.3
食盐 NaCl	0.2
豆油 Soybean oil	8.0
预混料 Premix1)	1.0
合计 Total	100.0
营养水平 Nutrient levels2)	
代谢能 ME/(MJ/kg)	16.18
粗蛋白质 CP	30.30
粗脂肪 EE	12.80
赖氨酸 Lys	1.36
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	1.18

钙 Ca	2.38
总磷 TP	1.30
铜 Cu/(mg/kg)	7.78

[1)]每千克预混料含有 Contained the following per kg of premix：VA 1 000 000 IU，VD_3 200 000 IU，VE 6 000 IU，VB_1 6 00 mg，VB_2 800 mg，VB_6 10 mg，VK_3 100 mg，VC 40 000 mg，烟酸 niacin acid 4 000 mg，泛酸 folic acid 80 mg，胆碱 choline 30 000 mg，Fe 8 200 mg，Mn 1 200 mg，Zn 5 200 mg，I 50 mg，Se 20 mg，Co 50 mg。

[2)]粗蛋白质、粗脂肪、钙、总磷、铜为测定值，其他为计算值。Values of CP, EE, Ca and TP were measured and others were calculated values.

1.2 试验设计与饲养管理

试验采用单因素完全随机试验设计，将 50 只 150 日龄左右的健康雌性蓝狐随机分成 5 组（Ⅰ～Ⅴ组），每组 10 个重复，每个重复 1 只，分别饲喂对应试验饲粮。试验蓝狐均为单笼(105 cm×80 cm×70 cm)饲养，每日 08:00 与 15:00 分别饲喂 1 次，自由采食，自由饮水，每日记录实际采食量。预试期 7 d，正试期 60 d，试验地点为农业部长白山野生生物资源重点野外科学观测试验站。

1.3 消化代谢试验

正式试验开始后 30 d，每组随机挑选 8 只健康蓝狐进行为期 5 d 的消化代谢试验。试验采用全收粪法，采用粪尿可分离式接粪盘收集蓝狐每日的粪便及尿液。消化代谢试验期间饲养管理与日常饲养管理完全相同。每天收集的粪便称重后按鲜重的 5%加入 10%的硫酸溶液，并加入少量甲苯防腐，保存于-20 ℃备用。每日收集的尿液按每 100 mL 加入 10 mL 10%硫酸溶液，滴加 4 滴甲苯防腐，保存于-20 ℃备用。

1.4 测定指标及方法

正试期第 1 天早晨对蓝狐进行空腹称重，为试验动物的初始体重，以后每隔 15 d 称重 1

次，记录体重，并以试验结束时的体重作为终末体重；记录每只蓝狐每天的给料量和剩料量，计算每只蓝狐的采食量以及每组的采食量，并计算出平均日采食量、平均日增重和料重比。

饲粮及排泄物中的干物质含量采用 65 ℃烘干法测定，参照 GB/T 6435-2006；采用凯氏定氮法测定粗蛋白质的含量，参照 GB/T 6432-1994；采用索氏抽提法测定粗脂肪的含量，参照 GB/T 6433-2006。采用火焰原子吸收法测定饲粮铜水平及肝脏及排泄物中铜的含量，参照 GB/T 13885-2003。

干物质消化率（%）=[（干物质采食量-干物质排出量）/干物质采食量]×100；

蛋白质消化率（%）=[(蛋白质摄入量-粪中蛋白质含量)/蛋白质摄入量]×100；

粗脂肪消化率（%）=[（脂肪摄入量-粪中脂肪含量）/脂肪摄入量]×100；

氮沉积（g/d）=食入氮-粪氮-尿氮。

采用日立 7020 型全自动生化分析仪测定血清中总蛋白（TP）、白蛋白（ALB）、球蛋白（GLO）、尿素氮（UN）含量及天冬氨酸转氨酶（AST）、丙氨酸转氨酶（ALT）活性，测定所用试剂盒购自中生北控生物科技股份有限公司。采用紫外/可见光分光光度计（耶拿）测定血清中铜蓝蛋白（Cp）、铜锌超氧化物歧化酶（Cu-Zn SOD）活性，测定所用试剂盒购自南京建成生物工程研究所，测定过程严格参照试剂盒说明书进行。

体长的测定：使用软尺测量鼻尖到尾根的长度。

针毛长和绒毛长的测定：在蓝狐背中部使用游标卡尺测量毛尖到毛根部的长度。

干皮长的测定：鲜皮经干燥加工后，用软尺测量鼻尖到尾根的长度。

毛皮质量感官评分：请有经验的专家，对皮张底绒丰满度、皮张颜色进行感官打分评定。底绒丰满度满分为 10 分，底绒越密得分越高；皮张颜色满分为 5 分，颜色越深得分越高。

1.5 数据统计分析

结果以平均值±标准差表示，试验数据采用 SAS 9.1.3 软件进行统计分析，在单因素方差分析（one-way ANOVA）达到显著水平时，采用 Duncan 氏法进行多重比较检验，其中

P<0.05 为差异显著，P<0.01 为差异极显著。

2 结 果

2.1 饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐生长性能的影响

由表 2 可知，III、Ⅳ及Ⅴ组蓝狐的平均日增重显著高于对照组(P<0.05)，料重比显著低于对照组(P<0.05)，其他各组间差异不显著(P>0.05)。各组蓝狐的初始体重、终末体重、平均日采食量均差异不显著(P>0.05)。

表 2 饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐生长性能的影响

Table 2 Effects of dietary copper level on growth performance of female blue foxes in fur development period

项目	组别 Groups				
Items	I	II	III	Ⅳ	Ⅴ
初始体重 IBW/kg	5.40±0.57	5.42±0.64	5.41±0.51	5.40±0.76	5.46±0.67
终末体重 FBW/kg	7.81±0.59	7.98±0.64	8.05±0.67	8.07±0.74	8.01±0.59
平均日增重 ADG/(g/d)	40.19±2.86[b]	42.63±2.62[ab]	44.11±4.37[a]	44.43±2.69[a]	43.50±2.19[a]
平均日采食量 ADFI/(g/d)	320.19±0.25	321.54±0.46	319.85±0.41	320.53±0.74	321.71±0.52
料重比 F/G	8.03±0.62[a]	7.57±0.48[ab]	7.34±0.79[b]	7.25±0.46[b]	7.42±0.38[b]

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著(P＞0.05)，不同小写字母表示差异显著(P＜0.05)，不同大写字母表示差异极显著(P<0.01)。下表同。

In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference (P＞0.05), while with different small letter superscripts mean significant difference (P

<0.05), and with different capital letter superscripts mean significant difference ($P<0.01$). The same as below.

2.2 饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐营养物质消化率的影响

由表 3 可知，各组蓝狐干物质采食量、干物质排出量、干物质消化率、蛋白质消化率及氮沉积的差异均不显著（$P>0.05$）。III、Ⅳ组蓝狐的脂肪消化率显著高于对照组（$P<0.05$），其他各组间差异不显著（$P>0.05$）。随着饲粮铜水平的升高，铜的排出量呈升高趋势，各组间差异极显著（$P<0.01$）。

表 3 饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐营养物质消化率的影响

Table 3 Effects of dietary copper level on nutrient digestibility of female blue foxes in fur development period

项目 Items	组别 Groups I	II	III	Ⅳ	V
干物质采食量 DM intake/(g/d)	310.51±0.25	310.76±0.46	309.40±0.41	309.22±0.74	310.72±0.52
干物质排出量 DM output/(g/d)	113.15±13.40	113.84±9.52	115.90±7.35	114.89±11.01	113.80±6.27
干物质消化率 DM digestibility/%	63.56±4.34	63.37±3.09	64.17±2.37	63.80±3.58	63.37±2.04
蛋白质消化率 Protein digestibility/%	62.65±4.63	62.03±3.23	63.35±2.89	63.54±4.76	62.91±4.51
脂肪消化率 Fat digestibility/%	88.79±0.96[a]	89.82±1.44[ab]	90.11±1.25[b]	90.28±0.76[b]	89.75±0.76[ab]

氮沉积 N retention/(g/d)	3.79±0.54	3.82±1.13	3.89±0.97	3.82±1.50	3.85±1.73
铜排出量 Cu output/(mg/kg DM)	11.12±2.91^{A}	30.81±7.38^{B}	69.75±11.39^{C}	172.99±18.32^{D}	389.23±21.05^{E}

2.3 饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐血清生化指标的影响

由表 4 可知，Ⅴ组蓝狐血清总蛋白和白蛋白含量显著高于对照组及Ⅱ组（P<0.05），血清球蛋白含量各组间差异不显著（P>0.05）。Ⅴ组蓝狐血清尿素氮含量显著高于Ⅱ组（P<0.05），其他各组间差异不显著（P>0.05）。血清 AST 及 ALT 活性随饲粮铜水平的升高有升高的趋势，但各组间差异不显著（P>0.05）。蓝狐血清铜蓝蛋白活性各组间无显著差异（P>0.05），Ⅳ组血清 Cu-Zn SOD 活性显著高于对照组及Ⅱ和Ⅲ组（P<0.05）。

表 4　饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐血清生化指标的影响

Table 4　Effects of dietary copper level on serum biochemical parameters in female blue foxes in fur development period

项目 Items	组别 Groups				
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
总蛋白 TP/(g/L)	55.73±2.83^{a}	56.82±4.68^{a}	60.70±1.42^{ab}	61.42±3.89^{ab}	66.64±6.95^{b}
白蛋白 ALB/(g/L)	22.66±0.70^{a}	22.85±2.1 ^{a}	23.49±1.62^{ab}	24.36±1.38^{ab}	27.64±2.05^{b}
球蛋白 GLO/(g/L)	33.07±2.37	33.97±6.27	37.81±2.40	37.06±4.43	39.00±7.77
尿素氮 UN/(mmol/L)	2.95±0.48^{ab}	2.84±0.14^{a}	3.02±0.25^{ab}	3.06±0.41^{ab}	3.49±0.57^{b}
天冬氨酸转氨酶 AST/(U/L)	68.28±21.51	77.40±14.83	72.05±14.78	78.43±22.79	85.49±15.27
丙氨酸转氨酶	131.08±15.12	122.57±18.90	128.56±28.91	133.39±36.64	149.76±29.75

ALT/(U/L)					
铜蓝蛋白 Cp/(U/L)	13.70±3.29	10.51±2.70	12.26±4.29	14.99±5.17	13.82±4.24
铜锌超氧化物歧化酶 Cu-Zn SOD (U/mL)	27.88±3.74[a]	27.82±3.62[a]	27.27±6.65[a]	34.21±3.96[b]	33.92±8.47[ab]

2.4 饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐血清铜、锌、铁及肝脏铜含量的影响

由表 5 可知，Ⅴ组蓝狐肝脏铜显著高于对照组（*P*<0.05）。蓝狐血清铜、锌及铁含量各组之间无显著差异(*P*>0.05)。

表 5 饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐血清铜、锌、铁及肝脏铜含量的影响

Table 5 Effects of dietary Cu level on serum Cu, Zn, Fe and liver Cu contents of female blue foxes in fur development period

项目 Items	组别 Groups				
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
肝脏铜 Liver Cu/(mg/kg DM)	152.68±48.44[b]	187.13±50.91[ab]	206.79±41.30[ab]	220.63±46.69[ab]	251.80±55.16[a]
血清 Serum/（μmol/L）					
铜 Cu	11.60±0.76	10.98±1.19	12.29±0.85	12.83±2.56	12.98±1.46
锌 Zn	42.05±11.26	48.58±10.43	41.36±9.69	48.11±7.91	47.81±4.53
铁 Fe	82.64±17.62	62.56±18.75	83.38±36.05	80.34±18.85	65.98±23.48

2.5 饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐毛皮品质的影响

由表 6 可知，各组蓝狐体长和干皮长差异不显著（*P*>0.05）。Ⅲ组和Ⅴ组蓝狐的针毛长及绒毛长显著大于Ⅱ、Ⅳ组（*P*<0.05）。Ⅲ、Ⅳ组蓝狐干皮长较大，对照组最小，但各组间差异不显著（*P*>0.05）。饲粮铜水平对底绒丰满度无显著影响（*P*>0.05）。Ⅴ组蓝狐的皮张颜色相较于对照组更深(*P*<0.05)。

表 6　饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐毛皮品质的影响

Table 6　Effects of dietary copper level on fur quality of female blue foxes in fur development period

项目 Items	组别 Groups I	II	III	IV	V
体长 Body length/cm	61.40±2.41	61.60±0.55	63.00±2.92	62.80±1.64	62.40±2.97
针毛长 Guard hair length/cm	5.52±0.27[ab]	5.24±0.61[b]	5.76±0.71[a]	5.28±0.45[b]	5.78±0.26[a]
绒毛长 Underfur length/cm	4.64±0.15[ab]	4.30±0.53[b]	4.78±0.49[a]	4.36±0.09[b]	4.82±0.36[a]
干皮长 Dry fur length/cm	105.60±4.95	106.68±3.92	107.21±8.05	107.59±5.35	106.96±4.32
底绒丰满度 Hair density/分	8.90±0.65	8.80±0.50	8.90±0.45	9.00±0.22	8.90±0.22
皮张颜色 Fur color/分	3.85±0.22[a]	4.00±0.22[ab]	4.00±0.22[ab]	4.10±0.27[ab]	4.20±0.27[b]

3　讨　论

3.1　饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐生长性能的影响

NRC（1982）[10]指出，水貂和蓝狐饲粮中铜的需要量为 4.5~6.0 mg/kg，经测定，本试验中基础饲粮中铜水平为 7.78 mg/kg，可以满足蓝狐对铜的需要量。大量研究表明饲粮中添加高剂量的铜（125～250 mg/kg）能够促进猪[14]、肉鸡[15]及獭兔[16]的生长，提高饲料利用率。本研究结果表明，饲粮中添加适量的铜同样能够提高雌性蓝狐的平均日增重，降低料重比。铜促生长作用的机理主要有增加采食量、提高消化酶活性和营养物质消化率、抗微生物作用以及促进生长相关激素的分泌等[17]。本试验中，饲粮中添加铜并未提高蓝狐的平均日

采食量，这与 Zhou 等[18]在猪上的研究结果不一致，可能是不同物种的生理特性不同导致的。Dove[19]研究发现，饲粮中添加 250 mg/kg 铜能够提高猪对饲粮中营养物质的消化率。本试验中铜的添加提高了蓝狐对饲粮中脂肪的消化率，这与 Dove[19]在猪上的研究结果一致。由于蓝狐为肉食动物，对饲粮中脂肪水平要求较高[20]，脂肪消化率的提高在很大程度上改善了饲粮的利用率，并促进了冬毛期蓝狐脂肪的囤积和体重的增加。LaBella 等[21]研究证明铜可以刺激牛垂体分泌生长激素（GH）。Yang 等[22]研究表明，饲粮中添加 125 mg/kg 硫酸铜或蛋氨酸铜能够促进猪生长激素释放激素（GHRH）的分泌，抑制生长抑素（SS）的分泌。铜对蓝狐生长相关激素的影响仍不清楚，需要进一步的研究。

3.2　饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐营养物质消化率的影响

本研究表明饲粮中适宜水平的铜能够促进饲粮中脂肪的消化率，这与在猪[19]及水貂[23]上的研究结果一致。Luo 等[24]研究发现，饲粮中添加铜能够提高断奶仔猪小肠脂肪酶和磷脂酶 A 的活性。胆汁是脂肪消化过程中的重要物质，能够通过乳化脂肪形成脂肪微粒，提高脂肪与脂肪酶的接触面积，促进脂肪的消化[25]。由于胆汁是机体铜排泄的主要途径，摄入高水平的铜会促进胆汁的分泌[26]，进而促进脂肪的消化。饲粮中干物质消化率、蛋白质消化率及氮沉积并未受到饲粮铜水平的影响，这与在 Wu 等[6]在水貂上的研究结果一致。Roberts 等[27]研究表明绝大多数（85%）的饲粮铜由胆汁分泌并经由粪便排出体外。因此，随着饲粮铜水平的升高，蓝狐粪便中铜的含量即铜排出量急剧升高。

3.3　饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐血清生化指标的影响

蛋白质是血清的主要成分，对于维持机体渗透压及保持水分平衡极为重要。血清中的总蛋白主要包括白蛋白和球蛋白。白蛋白在机体铜的转运过程中发挥着重要的作用。本试验结果表明饲粮中添加铜提高了血清白蛋白和总蛋白的含量，这与在水貂[23]上的研究结果一致。尿素是体内氨基酸分解代谢后的最终产物之一，血液中的尿素来源于肝脏，并通过是肾脏排出体外。李道林[28]研究发现獭兔血清尿素氮含量会随着饲粮中铜水平的升高而降低，这与

本试验的结果不一致，结果差异可能是蓝狐与獭兔不同的生理特性造成的。血清 ALT 和 AST 活性是检测肝功能的重要指标，研究表明高铜造成动物肝脏损伤，致使血清 AST 和 ALT 活性升高[29-30]。本试验中，饲喂最高铜水平饲粮组的蓝狐血清 AST 与 ALT 活性较高，但与其他组相比差异并不显著。由于本试验所设饲粮最大铜水平为 160 mg/kg，远远低于上述研究的添加量（600 mg Cu/kg DM），对肝脏的伤害也较小，因此结果差异不显著。铜蓝蛋白是由肝脏合成的一种含铜氧化还原酶，能够参与体内铁的代谢。Zhong 等[7]研究表明饲粮中添加铜并未显著提高银狐血清铜蓝蛋白的活性，与本研究结果相一致。Cu-Zn SOD 是动物体内一种重要的抗氧化物质，能够清除体内的自由基，保护细胞免受伤害。冯杰等[31]研究表明，饲粮中添加高铜能够提高仔猪血清 Cu-Zn SOD 的活性。本研究中，Cu-Zn SOD 的活性随饲粮铜水平的升高而提升，这与冯杰等[31]在仔猪上的研究结果相一致。

3.4　饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐血清铜、锌、铁及肝脏铜含量的影响

本研究表明，血清铜、锌、铁含量并未受到饲粮铜水平的显著影响，而肝脏铜含量随着饲粮铜水平的升高而增加。Danzeisen 等[32]报道，动物血浆中铜的含量受到的机体严格调控，并不能反映当前动物体内铜的状态。在可调节的范围内，机体可以通过调节十二指肠铜的吸收和胆汁铜的排放来维持血清中铜含量的稳定[33]。目前，唯一能准确反映机体铜过量的指标是肝脏铜含量[34]。在本研究中，肝脏铜含量随饲粮铜水平的升高而增加，这反映了蓝狐正处于铜过量的状态，而由于机体对血清铜的调节作用，因此，各组蓝狐血清铜含量差异不显著。本研究结果与 Zhong 等[7]在银狐上的报道一致。尽管铜与锌之间[35]和铜与铁之间[36]存在着互作效应，但在本试验中，血清中锌、铁的含量并未受到饲粮铜水平的显著影响，原因可能是饲粮铜水平较低，不足以影响另外 2 种元素的吸收和代谢。

3.5　饲粮铜水平对冬毛期雌性蓝狐毛皮品质的影响

Lorek 等[37]研究表明，蓝狐体长与皮长之间（R^2=0.616）以及体重与皮长（R^2=0.754）之间存在显著的正相关。本研究中Ⅲ、Ⅳ组蓝狐有较大的体重和体长，因此皮长指标优于其

他组蓝狐。饲粮的营养水平是影响毛皮品质的重要因素[38-39]，但饲粮铜水平对蓝狐毛皮品质的影响尚未有报道。Zhong 等[7]研究发现，饲粮中添加 30 mg/kg 柠檬酸铜（总铜水平为 35 mg/kg）能够提高雌性银狐针毛长度和皮板厚度。Wu 等[40]研究表明，铜能够增加水貂皮长，提高毛皮品质，加深毛色。本研究中，饲粮铜水平为 40 mg/kg 时，蓝狐的针绒毛长度较好，这与 Zhong[7]等在银狐上的研究结果一致。铜是酪氨酸酶的重要组成部分，而酪氨酸酶是黑色素合成过程中的关键限速酶。李继兴[41]研究表明，卡拉库尔羊体内铜含量与酪氨酸酶基因的表达呈正相关，饲粮中补饲铜能够提高酪氨酸酶活性。本试验中饲喂含 160 mg/kg 铜的饲粮的蓝狐皮张颜色较对照组深，原因可能是高剂量铜促进了酪氨酸酶基因的表达，提高了酪氨酸酶的活性，进而促进了黑色素的合成，使得毛色加深。这与 Aulerich 等[5]在水貂上的研究结果一致。

4 结　论

① 饲粮铜水平为 40.00~80.00 mg/kg 时，冬毛期雌性蓝狐可获得较快的生长，饲粮脂肪的消化率较高；饲粮铜水平为 40.00 mg/kg 时雌性蓝狐的皮长及毛皮品质较好；饲粮铜水平为 160.00 mg/kg 时能加深毛皮的颜色，但会造成肝脏铜的沉积并增加铜的排放。

② 综合得出，饲粮铜水平为 40.00 mg/kg（铜添加水平为 32.22 mg/kg）时，冬毛期雌性蓝狐可获得较好的生长性能、营养物质消化率及毛皮品质，同时在饲养中向环境排放的铜较低。

参考文献：

[1] LEOSCHKE W L.Nutrition and nutritional physiology of the fox:a historical perspective[M].Indiana:Trafford Publishing,2011.

[2] NRC.Mineral tolerance of animals[S].2nd ed.Washington,D.C.:National Academy Press,2005.

[3] 郭永佳,佟煜人.养狐实用新技术[M].北京:金盾出版社,2005.

[4] AULERICH R J,RINGER R K.Can copper sulphate in mink feed give advantages?[J].Vara Palsdjur,1977,48(3):103–105.

[5] AULERICH R J,RINGER R K,BLEAVINS M R,et al.Effects of supplemental dietary copper on growth,reproductive performance and kit survival of Standard dark mink and the acute toxicity of copper to mink[J].Journal of Animal Science,1982,55(2):337–343.

[6] WU X Z,LIU Z,ZHANG T T,et al.Effects of dietary copper on nutrient digestibility,tissular copper deposition and fur quality of growing-furring mink (*Mustela vison*)[J].Biological Trace Element Research,2014,158(2):166–175.

[7] ZHONG W,LIU H L,LUO G L,et al.Dietary copper supplementation improves pelt characteristics of female silver fox (*Vulpes fulva*) during the winter fur-growing season[J].Animal Science Journal,2014,85(7):757–762.

[8] 白玉妍,张浩,叶纯子,等.蛋氨酸铜、蛋氨酸锌对乌苏里貉冬毛生长期体重及毛皮质量的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2009(7):113–114.

[9] 刘志,张铁涛,郭强,等.饲粮铜水平对育成期蓝狐生长性能、营养物质消化率及氮代谢的影响[J].动物营养学报,2013,25(7):1497–1503.

[10] NRC.Nutrient requirements of mink and foxes[s].2nd ed.Washington,D.C.:National Academy Press,1982.

[11] 崔虎.日粮蛋白质和蛋氨酸水平对蓝狐生产性能及营养物质代谢的影响[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2012.

[12] DAHLMAN T,KIISKINEN T,MÄKELÄ J,et al.Digestibility and nitrogen utilisation of

diets containing protein at different levels and supplemented with *DL*-methionine,*L*-methionine and L-lysine in blue fox (*Alopex lagopus*)[J].Animal Feed Science and Technology,2002,98(3/4):219–325.

[13] 郭强,张铁涛,刘志,等.饲粮锌水平对冬毛期蓝狐生长性能、营养物质消化率、氮代谢及毛皮质量的影响[J].动物营养学报,2014,26(5):1414–1420.

[14] SHELTON N W,TOKACH M D,NELSSEN J L,et al.Effects of copper sulfate,tri-basic copper chloride,and zinc oxide on weanling pig performance[J].Journal of Animal Science,2011,89(8):2440–2451.

[15] SAMANTA B,BISWAS A,GHOSH P R.Effects of dietary copper supplementation on production performance and plasma biochemical parameters in broiler chickens[J].British Poultry Science,2011,52(5):573–577.

[16] BASSUNY S M.The effect of copper sulphate supplement on rabbit performance under Egyptian conditions[J].Journal of Applied Rabbit Research,1991,14(2):93–97.

[17] 刘晓波,罗绪刚,张荣强.高剂量铜对猪促生长作用机理的研究进展[J].动物营养学报,1997,9(3):1–6.

[18] ZHOU W,KORNEGAY E T,VAN LAAR H,et al.The role of feed consumption and feed efficiency in copper-stimulated growth[J].Journal of Animal Science,1994,72(9):2385–2394.

[19] DOVE C R.The effect of copper level on nutrient utilization of weanling pigs[J].Journal of Animal Science,1995,73(1):166–171.

[20] GENG Y Y,YANG F H,XING X M,et al.Effects of dietary fat levels on nutrient digestibility and production performance of growing-furring blue foxes (*Alopex lagopus*)[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2012,96(4):610–617.

[21] LABELLA F,DULAR R,VIVIAN S,et al.Pituitary hormone releasing or inhibiting activity

of metal ions present in hypothalamic extracts[J].Biochemical and Biophysical Research Communications,1973,52(3):786–791.

[22] YANG W Y,WANG J G,LIU L,et al.Effect of high dietary copper on somatostatin and growth hormone-releasing hormone levels in the hypothalami of growing pigs[J].Biological Trace Element Research,2011,143(2):893–900.

[23] WU X Z,ZHANG T T,GUO J G,et al.Copper bioavailability,blood parameters,and nutrient balance in mink[J].Journal of Animal Science,2015,93(1):176–184.

[24] LUO X G,DOVE C R.Effect of dietary copper and fat on nutrient utilization,digestive enzyme activities,and tissue mineral levels in weanling pigs[J].Journal of Animal Science,1996,74(8):1888–1896.

[25] CAREY M C,SMALL D M,BLISS C M.Lipid digestion and absorption[J].Annual Review of Physiology,1983,45:651–677.

[26] HARADA M,SAKISAKA S,YOSHITAKE M,et al.Biliary copper excretion in acutely and chronically copper-loaded rats[J].Hepatology,1993,17(1):111–117.

[27] ROBERTS E A,SARKAR B.Liver as a key organ in the supply,storage,and excretion of copper[J].American Journal of Clinical Nutrition,2008,88(3):851S-854S.

[28] 李道林.铜源和铜水平对生长獭兔的生长性能、毛皮品质及理化指标的影响[D].硕士学位论文.长春:中国人民解放军军需大学,2002.

[29] HWANG D F,WANG L C,CHENG H M.Effect of taurine on toxicity of copper in rats[J].Food and Chemical Toxicology,1998,36(3):239–244.

[30] SUGAWARA N,LI D,SUGAWARA C,et al.Response of hepatic function to hepatic copper deposition in rats fed a diet containing copper[J].Biological Trace Element Research,1995,49(2/3):161–169.

[31] 冯杰,刘欣,吴新民,等.酪蛋白铜对仔猪生长及血清铜蓝蛋白和SOD活性的影响[J].中国畜牧杂志,2005,41(3):14–17.

[32] DANZEISEN R,ARAYA M,HARRISON B,et al.How reliable and robust are current biomarkers for copper status?[J].British Journal of Nutrition,2007,98(4):676–683.

[33] TURNLUND J R,KEYES W R,PEIFFER G L,et al.Copper absorption,excretion,and retention by young men consuming low dietary copper determined by using the stable isotope ^{65}Cu[J].American Journal of Clinical Nutrition,1998,67(6):1219–1225.

[34] HAMBIDGE M.Biomarkers of trace mineral intake and status[J].Journal of Nutrition,2003,133(Suppl.3):948S-955S.

[35] 奉向东,邓激光,王伟,等.饲粮中高铜高锌在组织中残留及排泄规律的研究[J].检验检疫学刊,2009,19(1):21–23.

[36] 杨顺江,陈义风.在棉菜饼型日粮中添加锌、铜、铁对生长肥育猪生长的影响及其代谢过程中的相互关系[J].中国农业科学,1989,22(1):93–94.

[37] LOREK M O,GUGOLEK A,HARTMAN A.Studies on the relationship between body weight,trunk length and pelt size in common foxes (*Vulpes vulpes*)[J].Czech Journal of Animal Science,2001,46(11):481–484.

[38] DAHLMAN T,VALAJA J,NIEMELÄ P,et al.Influence of protein level and supplementary L-methionine and lysine on growth performance and fur quality of blue fox (*Alopex lagopus*)[J].Acta Agriculturae Scandinavica,Section A：Animal Science,2002,52(4):174–182.

[39] GUGOŁEK A,WYCZLING T,JANISZEWSKI P,et al.The effect of dietary methionine levels on the performance parameters of Arctic foxes (*Vulpes lagopus*)[J].Annals of Animal Science,2012,12(3):393–401.

[40] WU X Z,GAO X H,YANG F H.Effects of dietary copper on organ indexes,tissular Cu,Zn

and Fe deposition and fur quality of growing-furring male mink (*Mustela vison*)[J].Journal of Animal Science and Technology,2015,57:6.

[41] 李继兴.铜对卡拉库尔羊毛色影响的研究[D].硕士学位论文.阿拉尔:塔里木大学,2012.

Effects of Dietary Copper Level on Growth Performance, Nutrient Digestibility, Serum Biochemical Parameters and Fur Quality of Female Blue Foxes in Fur Development Period

LIU Zhi[1,2] WU Xuezhuang[1] GUO Qiang[3] ZHANG Tietao[3] GUO Jungang[1] GAO Xiuhua[1*] YANG Fuhe[3] XING Xiumei[1]

(1. *Institute of Feed Research, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing* 100081, *China;* 2. *Institute of Economic Animal and Plant Science, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Jilin* 132109, *China;* 3. *State Key Laboratory of Special Economic Animal Molecular Biology, Jilin* 132109, *China*)

Abstract: An experiment was conducted to investigate the effects of dietary copper (Cu) level on growth performance, nutrient digestibility, serum biochemical parameters and fur quality of female blue foxes in fur development period. Sixty healthy 115-day-old female blue foxes were randomly allocated to 5 groups with 10 replicates each and 1 fox per replicate. The foxes in the five groups were fed experimental diets with Cu supplemental levels of 0, 12.22, 32.22, 72.22 and 152.22 mg/kg using copper sulfate pentahydrate （$CuSO_4 \cdot 5H_2O$） as copper source, and the Cu level in the experimental diets were 7.78（group Ⅰ, as control group), 20.00（group Ⅱ), 40.00 （group Ⅲ）, 80.00 （group Ⅳ） and 160.00 mg/kg （group Ⅴ）, respectively. The pre-test period lasted for 7 days, and the trial lasted for 60 days. The results showed as follows: 1) foxes in groups Ⅲ, Ⅳ and Ⅴ had higher average daily gain (ADG) and lower feed/gain （F/G） compared with those in control group ($P<0.05$). Besides, dietary Cu level did not affect the

*Corresponding author, professor, E-mail: xiuhuagao@126.com （责任编辑　菅景颖）

average daily feed intake (ADFI) and final body weight (FBW) (P>0.05). 2) The digestibility of dry matter and protein, and nitrogen retention were not affected by dietary Cu level (P>0.05). Foxes in groups Ⅲ and Ⅳ had higher fat digestibility compared with that in control group (P<0.05). Cu output was significantly raised with the dietary Cu level increasing (P<0.01). 3) Serum total protein (TP) and albumin (ALB) contents in group Ⅴ were significantly higher than those in control group and group Ⅱ (P<0.05). Serum urea nitrogen (UN) content in group Ⅴ was significantly higher than that in group Ⅱ (P<0.05). The activity of serum Cu and zinc (Zn) superoxide dismutase (Cu-Zn SOD) in group Ⅳ was significantly higher than that in control group and group Ⅱ (P<0.05), but no significant difference was found in serum ceruloplasmin (Cp) activity among the five groups （P>0.05）. 4) Liver Cu content in group Ⅴ was significantly higher than that in control group (P<0.05), but no significant differences were observed in serum Cu, Zn and iron (Fe) contents among the five groups (P>0.05). 5) The body length and dry fur length were not affected by dietary Cu level (P>0.05). Guard hair length and underfur length in groups Ⅲ and Ⅴwere significantly higher than those in groups Ⅱ and Ⅳ (P<0.05). Foxes in group Ⅴ had a darker fur color compared with control group (P<0.05). It is concluded that diet supplemented with 32.22 mg/kg Cu (Cu level is 40.00 mg/kg) can promote growth performance, nutrient digestibility and fur quality of female blue foxes in fur development period. Meanwhile, Cu excretion was relatively low when foxes were fed 40.00 mg/kg Cu diet.

Key words: copper; growth performance; nutrient digestibility; fur quality; fur development period; blue foxes